

穆晓雅,徐天乐,葛小东,等.湖北省区域碳中和能力评价研究[J].华中农业大学学报,2024,43(3):100-110.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.03.010

湖北省区域碳中和能力评价研究

穆晓雅,徐天乐,葛小东,黄佳佳,荣维康,曹聪格,曾妍玉

华中农业大学资源与环境学院,武汉430070

摘要 为从区域尺度研究净碳排放变化特征及碳中和能力并从区域尺度上实现“碳中和”目标,借鉴《IPCC温室气体排放》《省级温室气体清单编制指南》给定的方法、碳密度法等方法,对湖北省碳排放量、碳汇量及净碳排放量(CO_2e)进行了评价,并针对净碳排放量的变化趋势分析湖北省区域碳中和能力。结果显示:2000—2020年,湖北省区域碳汇总量为264 178万t,历年碳汇量呈现较为明显的上升趋势,增长幅度约135.21%,年均增长约6.76%;湖北省2000—2020年区域碳排放总量为910 331万t。历年碳排放总量的变化趋势可分为2个阶段,2000—2010年为第一阶段,湖北省碳排放总量呈现显著增加的趋势;2011—2020年为第二阶段,湖北省碳排放总量呈现波动下降的趋势;第一阶段湖北省净碳排放量呈上升趋势, Z_{M-k} 统计量通过了显著性检验,具有统计学意义;第二阶段湖北省净碳排放量呈现下降趋势,但 Z_{M-k} 统计量未能通过显著性检验,即湖北省净碳排放量在第二阶段有下降趋势,但这种趋势并不具有统计学意义。研究结果表明,当前湖北省的生态系统碳汇量与碳排放量仍有巨大差距,净碳排放量的变化仍存在一定的不确定性,应当持续深入进行碳减排,优化生态系统碳汇功能,并大力发展碳捕获技术与相关产业。

关键词 碳中和;生态系统碳汇;碳排放;优化管理;湖北省

中图分类号 S181; X32 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)03-0100-11

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的评估结果,大气 CO_2 浓度从人类进入工业革命以来,已经由 285 g/m^3 增加至 414 g/m^3 ,全球平均地表温度也上升了 $1.09\text{ }^\circ\text{C}$ ^[1]。若这一升温趋势得不到有效控制,将导致生态系统持续恶化,严重挑战人类社会的可持续发展能力。为了减缓由温室气体增加导致的全球变暖趋势,《巴黎协定》要求到21世纪末,全球平均气温与前工业化时期相比,上升幅度控制在 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 以内,并尽力控制在 $1.5\text{ }^\circ\text{C}$ 以内^[2]。在此目标下,人类应当对人为碳排放施加影响。在2020年9月22日召开的第七十五届联合国大会上,国家主席习近平宣布:“中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”。

“碳中和”是指通过各种途径排放的碳,例如通过化石燃料的使用以及土地利用变化产生的碳排放量与陆地生态系统、海洋生态系统吸收及其他方式固存的碳量之间达到平衡,最终实现二氧化碳的净

零排放^[3]。显然,碳减排与碳增汇是影响碳中和的2个直接因素^[4]。当前,有关碳中和的全球经验仍有不足,我国“双碳”战略目标实现的期限更短,“碳中和”面临巨大挑战。随着社会经济快速发展与转型、生态文明建设不断推进和深化,中国迫切需要针对“碳中和”涉及的众多基础科学问题进行详实的研究^[5]。

区域是指具有特定的资源禀赋、经济上相对独立、结构比较完整、内部同质性较高的空间单元。区域自身的发展具有系统性、连续性以及相对独立性。不同区域之间因区位条件差异存在异质性,也因各自区位优势而形成相互发展的关联性。各个区域的发展共同决定了整体发展水平。根据中国政府承诺的“碳中和”目标,至2060年前,各类碳汇应当抵消碳排放。不同区域的经济发展水平不同、碳排放减排压力和难度不同。同时,不同区域的自然碳汇在种类、规模、结构等方面都存在着明显的差异,面临的碳减排与发展转型挑战也存在差异。当前,从区域尺度来分析碳中和能力、解构相关发展路径的研究

收稿日期:2023-05-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(2662022ZHYJ004)

穆晓雅,E-mail:muxiaoya2021@163.com

通信作者:葛小东,E-mail:gexd@mail.hzau.edu.cn

相对较少^[6]。

随着经济社会的快速发展,全社会对能源的需求量逐步扩大,湖北省能源消费总量不断攀升,碳排放总量也呈现持续递增的趋势^[7]。湖北省作为“中部崛起”的主要战略支点,区域碳减排压力不断递增。湖北省的生态环境健康不仅关系着湖北省的可持续发展,对长江经济带乃至我国的可持续发展都起着至关重要的作用。但近年来湖北省林地资源过度开采,自然生态环境遭到破坏,迫切需要加大陆地生态系统的保护力度。本研究以湖北省作为案例地,对区域碳汇和碳排放进行评价,并以此为基础分析湖北省的碳中和能力,以期为从区域尺度上实现“碳中和”目标提供理论借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

湖北省积极响应国家号召,不断推进碳中和工作,先后出台《湖北2030碳排放达峰行动方案》《湖北省碳达峰、碳中和科技创新行动方案》等政策,加快构建“碳达峰”“碳中和”的新发展布局,继续优化绿色低碳健康发展的经济体系^[8]。

本研究以湖北省作为案例地,对区域碳汇和碳排放进行评价。

1.2 湖北省区域碳汇评价方法

生态系统是地球系统多圈层耦合的重要组成部分,对气候变化敏感。不同类型的生态系统对全球碳收支及平衡具有不同的作用,从而影响气候变化。本研究将陆地生态系统划分为森林生态系统、农田生态系统、草地生态系统和湿地生态系统4种类型,据此评价湖北省2000—2020年碳汇量变化特征。

1)森林生态系统碳汇评价方法及相关参数。森林是陆生生态系统的主体,具有显著的固碳功能,在减缓全球气候变化中有着不可替代的地位和作用。本研究采用碳密度法来计算森林生态系统的碳储量(包括林木固碳量、林下植物固碳量和林地固碳量^[9]),以森林生态系统碳储量的年际变化来表征森林生态系统碳汇,计算公式见式(1)~(5)。

$$C_{sfo,t} = C_{fo,t} - C_{fo,t-1} \quad (1)$$

$$C_{fo} = C_{fo1} + C_{fo2} + C_{fo3} \quad (2)$$

$$C_{fo1} = V_f \times \delta \times \rho \times \gamma \quad (3)$$

$$C_{fo2} = \alpha \times C_{fo1} \quad (4)$$

$$C_{fo3} = \beta \times C_{fo1} \quad (5)$$

式(1)中, $C_{sfo,t}$ 为第 t 年森林生态系统碳汇量,万

t; $C_{fo,t}$ 为第 t 年森林生态系统碳储量,万t; $C_{fo,t-1}$ 为第 $t-1$ 年森林生态系统碳储量,万t。式(2)中, C_{fo1} 为林木固碳量,万t; C_{fo2} 为林下植物固碳量,万t; C_{fo3} 为林地固碳量,万t。式(3)中, v_f 为林木蓄积量, m^3 ; δ 为林木蓄积量的生物量转换系数,一般取1.90; ρ 为林木生物量的干质量系数; γ 为将生物干质量转换成固碳量的系数; α 为林下植物碳汇系数; β 为林地碳汇转换系数。根据文献[10]对相关参数进行筛选,林木生物量转换系数 δ 取1.90;林木生物量干质量系数 ρ 取0.50;林木固碳系数 γ 取0.5;林下植物碳汇转换系数 α 取0.195;林地碳汇转换系数 β 取1.244。

2)农田生态系统碳汇评价方法及相关参数。农田生态系统具有碳汇和碳源两方面的作用^[11],一方面农作物通过光合作用吸收大气中的二氧化碳合成有机物、土壤中的自养微生物通过利用无机碳来促进自身快速生长繁殖的过程实现碳汇作用;另一方面农业生产过程中化肥、农药、农膜的投入,动植物、微生物的残体在土壤中腐烂等过程中又会有一部分二氧化碳重新返回到大气中。本研究通过将农业生态系统的碳吸收过程和碳排放过程分开核算,对农业生态系统整体的碳源/汇进行评估。碳吸收考虑农作物生长过程中通过光合作用固定的碳量和土壤固碳量。但由于国内土壤固碳量的测定数据极少,因此,参考美国 and 欧洲有关土壤固碳的相关研究成果来大致估算湖北省的土壤固碳量(美国:土壤固碳约为植被固碳的2/3;欧洲:土壤固碳约为生态系统总固碳的30%^[12]),计算公式见式(6)~(8)。

$$C_{st,t} = C_{sv,t} + C_{ss,t} \quad (6)$$

$$C_{sv,t} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times Y_{i,t}}{H_i} \quad (7)$$

$$C_{ss,t} = a \cdot C_{sv,t} \quad (8)$$

式(6)~(8)中, i 为农作物的种类; $C_{st,t}$ 为第 t 年农田生态系统的碳汇量,万t; $C_{sv,t}$ 为第 t 年农田生态系统农作物生长吸收固定的碳汇量; $C_{ss,t}$ 为第 t 年农田生态系统土壤微生物吸收固定的碳汇量; a 为土壤固碳量占农作物生长吸收固定碳汇量的比例; $Y_{i,t}$ 为第 i 类农作物第 t 年的经济产量,万t; C_i 表示第 i 类农作物的碳吸收率; H_i 为第 i 类农作物的经济系数,即收获产量占生物产量的比例。农作物碳吸收率 C_i 和经济系数 H_i 通过相关文献^[13-15]整理得到,如表1所示。

3)草地生态系统和湿地生态系统碳汇评价方法及相关参数。在全球碳循环过程中,草地生态系统和湿地生态系统是不可或缺的环节。湖北省草地资

表1 主要农作物的经济系数和碳吸收率
Table 1 Economic coefficients and carbon uptake rates of major crops in China

农作物 Crop	经济系数 Economic coefficient	碳吸收率 Carbon absorptivity
玉米 Corn	0.40	0.471
豆类 Beans	0.35	0.45
水稻 Rice	0.45	0.414
小麦 Wheat	0.40	0.485
棉花 Cotton	0.10	0.450
花生 Peanut	0.43	0.450
油菜 Rapeseed	0.25	0.450

源优良,但草地面积在整个湖北省的面积占比并不高,草地资源主要分布在咸宁、十堰、恩施等地区。湖北省湿地总面积较大,湿地资源优势明显。根据相关文献^[16],湖北省湿地植物以草本植物为主,约占82.82%;木本植物约有200种左右,占总数的17.18%^[17]。在湖北省湿地草本植物中,多年生草本植物所占比例较大,2年生以下草本植物占比相对较小。由于湖北省水系丰富,湿地植物群落组成较为复杂,湿地生态系统的碳汇研究仍有一定的欠缺。本研究基于碳密度法估算草地生态系统和湿地生态系统的碳汇量,见式(9)和(10)。

$$C_{sg,t} = \rho_g \times S_{g,t} \quad (9)$$

$$C_{sw,t} = \rho_w \times S_{w,t} \quad (10)$$

式(9)和(10), $C_{sg,t}$ 为第 t 年草地生态系统的碳汇量,万t; ρ_g 为草地生态系统的碳密度,万t/hm²; $S_{g,t}$ 为第 t 年草地生态系统的面积,万hm²; $C_{sw,t}$ 为第 t 年湿地生态系统的碳汇量,万t; ρ_w 为湿地生态系统的碳密度,t/hm²; $S_{w,t}$ 为第 t 年湿地生态系统的面积万hm²。根据相关文献,确定草地生态系统的碳密度 ρ_g 为20.86 t/hm²^[3],湿地生态系统的碳密度 ρ_w 为4.1 t/hm²^[3]。

1.3 湖北省区域碳排放评价方法

依据《IPCC温室气体排放》《省级温室气体清单编制指南》给定的方法和参数构建湖北省区域碳排放评价方法。碳排放的核算如公式(11)所示。

$$E = \sum E_i = \sum T_i \cdot \delta_i \quad (11)$$

式(11)中, E 为碳排放总量,万t; E_i 为各类碳源的碳排放量,万t; T_i 为各类碳源的投入量; δ 为各类碳源的碳排放系数。

各类碳源及碳排放系数见表2。

按照《IPCC国家温室气体清单指南》推荐方法,碳排放包括能源活动、工业生产过程、农业土地利用

变化和林业、废弃物处理。一般认为,能源活动、工业生产活动和农业对碳排放贡献最大。根据文献^[18],由能源消耗所引起的碳排放是区域碳排放的主体,约占90.4%;其次为工业和农业,约占9.5%。因此,本研究主要从这3个方面对湖北省区域碳排放进行评价。

1)能源活动碳排放。依据湖北省能源消费结构特点以及湖北省能源统计年鉴,选取煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气这8类能源,将能源活动所产生的碳排放量作为湖北省的能源活动碳排放总量。

2)工业过程碳排放。对于工业过程的碳排放核算,由于工业过程所涉及的碳排放过程多样且工业生产流程复杂,本研究重点考虑水泥、钢铁、烧碱、合成氨产品生产过程中的CO₂排放^[19]。

3)农业碳排放。农业碳排放考虑农业生产物资投入(化肥、农药、农膜、农药、柴油在利用过程中以及农业灌溉和土地翻耕过程中所产生的碳排放)、稻田甲烷排放、畜禽养殖(动物肠道发酵甲烷排放、动物粪便甲烷和氧化亚氮排放),都转化为二氧化碳排放量进行核算。

1.4 湖北省区域碳中和能力评价方法

碳排放与碳汇的差异变化反映了区域在落实碳中和战略目标过程中的难易程度。采用Mann-Kendall(M-K)检验方法^[20]分析湖北省碳汇量、碳排放量以及二者差异的趋势变化,从而评价湖北省区域的碳中和能力。对于时间序列数据 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$,假设 H_0 表示数据序列不具有单调趋势,备选假设 H_1 则表示数据序列具有单调趋势。M-K检验定义的统计变量 Z_{M-K} 计算公式如(12)所示。在双边趋势检验的条件下,给定置信水平 α ,若 Z_{M-K} 的绝对值 $\leq Z_{1-\alpha/2}$,则接受原假设 H_0 。

$$Z_{M-K} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中, Z_{M-K} 为Mann-Kendall检验统计量; S 统计量用于分析序列数据与其后续数据的增量关系,其定义如公式(13)所示; $V(S)$ 为 S 统计量的方差,如公式(15)所示。

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (13)$$

表 2 碳源与碳排放系数
Table 2 Carbon sources and carbon emission coefficients

碳源 Carbon source		碳排放系数 Carbon emission coefficient		
能源活动 Energy activity	煤炭 Coal	0.714 3 kg/kg		
	焦油 Tar oil	0.971 4 kg/kg		
	原油 Crude oil	1.428 6 kg/kg		
	汽油 Gasoline	1.471 4 kg/kg		
	煤油 Kerosene	1.471 4 kg/kg		
	柴油 Diesel	1.457 1 kg/kg		
	燃料油 Diesel oil	1.428 6 kg/kg		
	天然气 Natural gas	1.330 0 kg/kg		
工业生产 Industrial production	水泥 Cement	0.538 0 kg/kg		
	钢铁 Steel	0.452 0 kg/kg		
	烧碱 Caustic soda	0.138 0 kg/kg		
	纯碱 Soda ash	0.138 0 kg/kg		
	合成氨 Synthetic ammonia	3.273 0 kg/kg		
农业生产物资投入 Input of agricultural production materials	化肥 Chemical fertilizer	0.895 6 kg/kg		
	农药 Pesticide	0.493 4 kg/kg		
	农膜 Agricultural film	0.518 0 kg/kg		
	农业灌溉 Agricultural irrigation	0.266 5 kg/kg		
农业 Agriculture	水稻种植 Rice planting	早稻 Early season rice	17.51 g(CH ₄)/m ²	
		中稻 Middle-season rice	58.17 g(CH ₄)/m ²	
		晚稻 Late rice	39.00 g(CH ₄)/m ²	
	畜禽养殖 Livestock and poultry breeding	肠道发酵 Intestinal fermentation	猪 Pig	1.00 kg(CH ₄)/(head·a)
			牛 Cow	47.00 kg(CH ₄)/(head·a)
			羊 Sheep	5.00 kg(CH ₄)/(head·a)
		粪便管理 Fecal management	家禽 Poultry	0.00 kg(CH ₄)/(head·a)
			猪 Pig	4.00 kg(CH ₄)/(head·a), 0.53 kg(N ₂ O)/(head·a)
			牛 Cow	1.00 kg(CH ₄)/(head·a), 1.39 kg(N ₂ O)/(head·a)
羊 Sheep	0.16 kg(CH ₄)/(head·a), 0.86 kg(N ₂ O)/(head·a)			
家禽 Poultry	0.02 kg(CH ₄)/(head·a), 0.02 kg(N ₂ O)/(head·a)			

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{t=1}^k f_t(f_t-1)(2f_t+5)}{18} \quad (15)$$

式(14)和(15)中, x_i 和 x_j 为时间序列数据; n 为样本数; t 表示分组数, 即数值相同的元素分为一组; f_t 表示第 t 组的数据样本个数。

基于原时间序列数据, 构造不同时间节点数据的差值序列, 并以该差值序列的中位数 β 来表征原数据序列的总体趋势情况, 如公式(16)所示。

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right) \quad (16)$$

式(16)中, $1 < i < j < n$ 。 β 值为正时表示原时间

序列具有上升趋势, 反之具有下降趋势。

在此基础上, 本研究继续采用 U_F 统计量和 U_B 统计量表征碳排放量、碳汇量及其差异的突变情况, 如公式(17)~(19)所示。

$$U_{F,i} = \left[\frac{S_i - E(S_i)}{\sqrt{\text{Var}(S_i)}} \right] \quad (17)$$

$$S_i = \sum_{j=i+1}^n r_{ij}, \text{ 其中 } r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (18)$$

$$E(S_i) = \frac{n(n-1)}{4}, \text{ Var}(S_i) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (19)$$

式(17)~(19)中, $U_{F,i}$ 表示时间序列中的 i 个数据的 U_F 统计量; 秩序列 S_i 为时间序列 X 中, 位于第 i 个数据后的、数值大于 x_i 的数据的个数; r_{ij} 为对应 x_i 与 x_j 的大小关系; $E(S_i)$ 与 $\text{Var}(S_i)$ 是 S_i 的期望值与方差。当统计量 $U_{F,i} > 0$ 时, 表明在第 i 个数据处, 数据

序列仍然呈上升趋势;反之序列在第*i*个数据处呈下降趋势。 $U_{B,i}$ 表示时间序列*X*按逆序重复 U_F 计算过程,同时令 $U_{B,i}$ 取值为 $-U_{F,i}$ ($i=n, n-1, \dots, 1$), $U_{B,i1}=0$ 。当 U_F 或 $U_{B,i}$ 统计量超过置信区间,表示上升或下降的趋势显著,若 U_F 和 $U_{B,i}$ 的交点在置信区间内,则考虑对应的时刻发生突变。本研究根据Mann-Kendall检验方法分析湖北省碳排放量、碳汇量和二者差异的变化趋势及突变情况。

1.5 数据来源

本研究数据来源较为广泛。其中,土地利用类型及面积来源于2000—2020年中国科学院地理科学与资源研究所的MODIS遥感影像数据(2000、2005、2010、2015、2018、2020年,其他年份的土地利用类型面积通过插值计算得到);碳密度数据主要基于文献资料综合分析得出。碳排放评价的数据来源于《IPCC温室气体排放》《省级温室气体清单编制指南》《湖北省统计年鉴》《湖北农村统计年鉴》。

2 结果与分析

2.1 湖北省区域碳汇变化特征

湖北省生态系统碳汇总量变化如图1A所示。2000—2020年,湖北省历年碳汇量呈现较为明显的上升趋势。2000年,湖北省区域碳汇量(CO_{2e} ,下同)为7 399.66万t,2020年为17 404.99万t,增长约135.21%,年均增长约6.76%。2000—2020年,湖北省区域碳汇总量为264 177.6万t,即湖北省2000—

2020年经由各类生态系统固碳作用,从大气捕获 CO_2 264 177.6万t。其中,森林生态系统总捕获量为137 403.42万t,占比52.01%;农田生态系统总捕获量为85 587.97万t,占比32.40%;草地生态系统总捕获量为31 007.43万t,占比11.74%;湿地生态系统总捕获量为10 178.74万t,占比3.85%(图1B)。总体来说,森林生态系统碳汇量贡献率最大,其次为农田生态系统,草地和湿地的碳汇量贡献率相对较低。

从碳汇的组成结构来看,森林生态系统碳汇占比在4个生态系统中是最大的,占比为52.01%;且增长较快,由2000年的2 210万t增长至2020年的10 883万t,增长率为392.44%,年均增长率为18.69%。在区域碳汇和碳中和方面发挥了重要的作用。

2000—2020年农田生态系统碳汇也呈现逐年增加的趋势。2000年农田生态系统碳汇量为3 246.40万t;2020年为44 559.35万t,增长40.44%,年均增长65.65万t。相比森林生态系统,农田碳汇增加速率较小,年均增长22.02%。

草地生态系统和湿地生态系统的碳汇贡献相对较小。草地生态系统历年碳汇量为1 462.29万~1 490.45万t。湿地生态系统历年碳汇量为476.99万~501.72万t。2000—2020年间,两类生态系统碳汇总量略有增加,但相对湖北省区域碳汇总量的占比不断下降,由2000年的26.26%下降为2020年的11.28%。

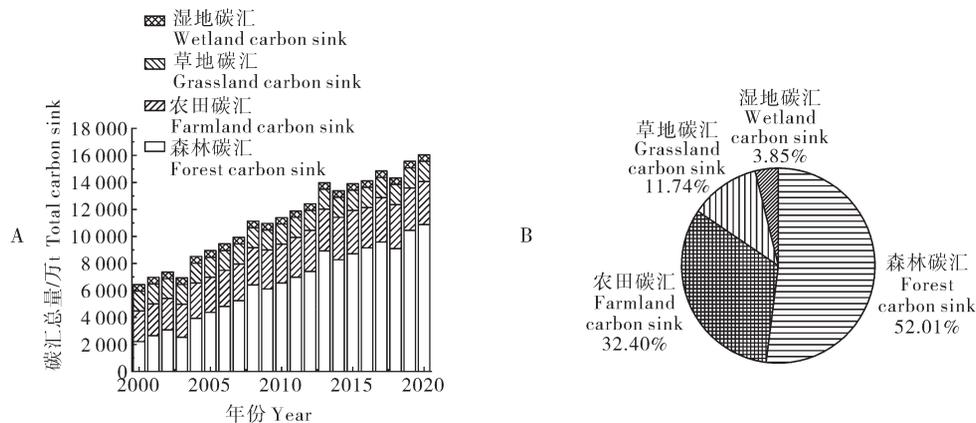


图1 湖北省生态系统碳汇总量变化(A)及各生态系统碳汇量占比(B)

Fig.1 Changes of carbon sink(A) and proportion of carbon sink of each ecosystem (B) in Hubei Province

2.2 湖北省区域碳排放评价结果

由图2A可见,湖北省区域碳排放量(CO_{2e} ,下同)的变化可分为2个阶段。2000—2010年为第一阶段,湖北省区域碳排放量呈现显著增加的趋势,2000年为22 642.8万t,2010年为551 036.90万t,增长

125.39%,年均增长12.54%。该时期湖北省碳排放总量为374 296.50万t,年平均排放量为34 026.95万t。2011—2020年为第二阶段,湖北省历年碳排放量略有波动,但总体上相对稳定。2011年湖北省碳排放总量为56 862.81万t,2011—2015年期间碳排

放呈现下降趋势,但2015—2020年又略有回升,至2020年为57 187.21万t,与2011年基本持平。第二阶段湖北省碳排放总量为536 035.96万t,年平均排放量为53 603.60万t。第一阶段湖北省碳排放量处于相对较低的水平,但增速较快;第二阶段处于相对较高的排放水平,但增速减缓甚至排放略有降低。

从碳排放占比(图2B)来看,能源活动所产生的碳排放最多,达到71.31%,2000年湖北省能源消耗碳排放为16 836.2万t,2020年湖北省能源消耗碳排放为40 834.20万t,增长近142.54%,年均增长7.13%。可见,能源消耗碳排放主导了湖北省区域碳排放的变化;且在能源活动碳排放中,煤炭、焦炭、原油、煤油、柴油等的碳排放量占比最大,而天然气这类清洁能源的占比较小,说明湖北省当前的能源消费结构仍然以煤炭为主,清洁能源的开发利用程度还不够。其次是工业碳排放,其占比约为23.90%,

2000年湖北省工业活动产生的碳排放为4 049.06万t,2020年增长为13 992.2万t,增长近245.57%,年均增长12.28%,说明工业活动碳排放仍然呈现较快的增长趋势。工业生产碳排放量中,钢铁生产过程中所产生的二氧化碳排放量占比最大,达到55.98%,其次是水泥和合成氨生产过程中产生的二氧化碳排放量,其占比分别为32.90%和18.99%;而烧碱、纯碱和玻璃生产过程中产生的二氧化碳占比相对较小,二氧化碳排放量总和的占比约为0.80%。农业碳排放占比约为4.79%,2000年湖北省农业活动碳排放为1 757.66万t,2020年增长为2 360.79万t,增长近34.32%,年均增长1.72%,增长速率较为缓慢。农业活动碳排放量中,畜禽养殖碳排放量占比最大,约占57.23%;其次是农业生产物资投入碳排放,约占23.61%,水稻种植碳排放量占比约为19.16%。

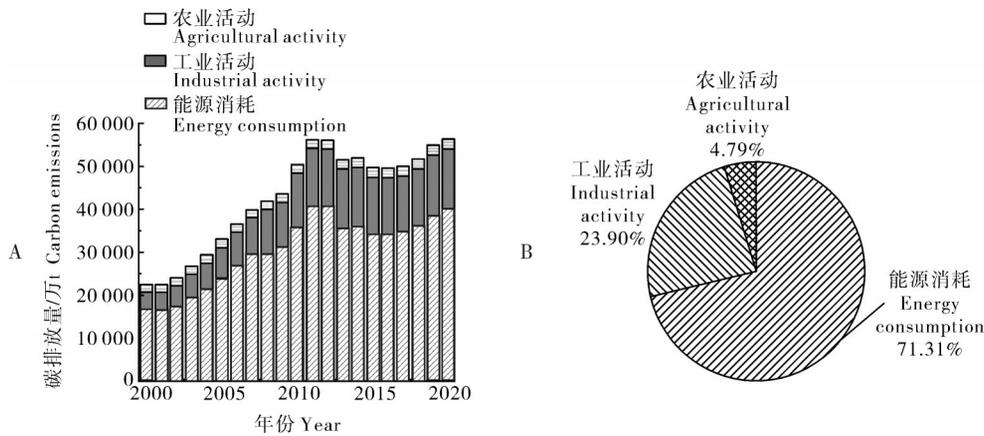


图2 湖北省碳排放量变化(A)及各类碳源碳排放量占比(B)

Fig.2 Changes of carbon emissions (A) and proportion of carbon emissions from various carbon sources (B) in Hubei Province

2.3 湖北省区域碳中和能力评价结果

由图3可见,湖北省碳排放量与碳汇量的差异较大。2000年,湖北省区域碳排放量为22 642.84万t,碳汇量为7 399.66万t,即经生态系统碳汇抵扣,湖北省区域净碳排放量仍有15 243.18万t。2000—2020年,湖北省净碳排放量变化呈现一定的阶段性规律。2000—2010年为第一阶段,湖北省净碳排放量增长明显。2010年,湖北省区域净碳排放量为38 406.32万t,相比2000年增长151.96%,年均增长15.20%。2011—2020年为第二阶段,湖北省净碳排放量呈现一定的下降趋势。2011年,湖北省区域净碳排放量为43 708.20万t CO_{2e},至2020年39 782.22万t,降低8.98%,年均降低0.90%。第二阶段2017年净碳排放量最低,为34 558.38万t,2018年以后再次上升。

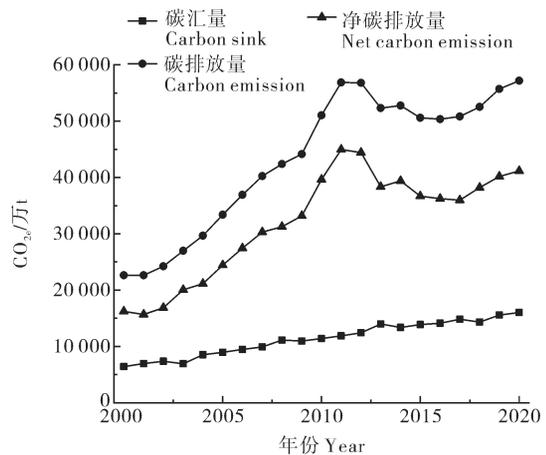


图3 湖北省碳排放量与碳汇差异变化

Fig.3 Changes in the difference of carbon sink and carbon emission in Hubei Province

碳中和的目标实质上是实现净碳排放量为零。因此,湖北省净碳排放量的变化反映了区域内落实碳中和目标的能力变化。净碳排放量越大,实现碳中和的难度越大;反之,实现碳中和的难度相对较小。为了进一步揭示湖北省净碳排放量变化趋势及其统计学意义,本研究基于 Mann-Kendall 检验方法对其进行分析。

从表3可见,2000—2010年,湖北省碳汇量、碳排放量以及净碳排放量的 β 统计量为503.16、2 839.06以及2 839.06,远大于0,表明该时期上述变量呈现出增长的趋势。这3个变量的 Z_{M-K} 统计值分别为3.68、4.02和4.02,均大于显著水平0.005的临界值2.32,通过了显著性检验($P<0.01$),表明该时期湖北省碳汇量、碳排放量以及净碳排放量的上升趋势具有统计学意义。

2011—2020年,湖北省碳汇量的 β 统计量为441.76,小于前一阶段的503.16,表明该时期碳汇量仍然呈现增长趋势,但增长幅度略低于前一阶段;碳汇量的 Z_{M-K} 统计量为3.3,大于2.32,通过了显著性检验($P<0.01$),说明其上升趋势具有统计学意义。湖北省碳排放量和净碳排放量的 β 统计量分别为-81.37和-431.65,表明该时期碳排放量和净碳排放量呈现了下降趋势。二者的 Z_{M-K} 分别为-0.16和-0.88,其绝对值小于显著性水平0.025的临界值1.96,未能通过显著性检验($P>0.05$)。以上情况表明,湖北省的碳排放量和净碳排放量在第二阶段有下降趋势,但这种趋势并不具有统计学意义,其变化仍存在较高的不确定性;湖北省净碳排量及碳中和能力的后续变化,需要进一步研究。

表3 湖北省碳汇量、碳排放量及净碳排放量的M-K趋势检验结果

Table 3 Mann-Kendall trend test of carbon sinks, carbon emission and net carbon emission

统计量 Statistic	第一阶段(2000—2010) The first stage(2000—2010)			第二阶段(2011—2020) The second stage(2011—2020)		
	碳汇量 Carbon sink	碳排放量 Carbon emission	净碳排放量 Net carbon emission	碳汇量 Carbon sink	碳排放量 Carbon emission	净碳排放量 Net carbon emission
	S	47	51	51	38	-2
V(S)	163	163	163	123	123	123
Z_{M-K}	3.68	4.02	4.02	3.3	-0.16	-0.88
β	503.16	2 839.06	2 839.06	441.76	-81.37	-431.65
发展趋势 Development	上升 Rise	上升 Rise	上升 Rise	上升 Rise	下降 Descend	下降 Descend
显著性 Significance	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P<0.01$	$P>0.05$	$P>0.05$

进一步用 U_F 和 U_B 统计量来阐明湖北省净碳排放量历年变化趋势及其突变情况,如图4所示。2000—2002年, U_F 统计量小于0,表明该时期湖北省净碳排放量略有减少。2002—2010年,其 U_F 统计量大于0,表明该时期湖北省净碳排放量呈现增

长趋势。尤其是2004年以后, U_F 统计量大于其置信区间,表明其增长有统计学意义。 U_F 统计量和 U_B 统计量的交点位于置信区间外,表明该时期湖北省净碳排放量的增长趋势相对稳定,不存在实际突变。

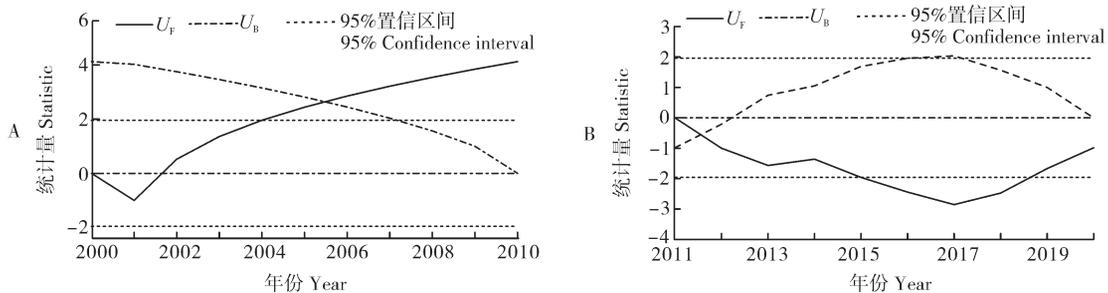


图4 湖北省2000—2010年(A)和2011—2020年(B)净碳排放量M-K突变检验曲线图

Fig.4 Curve of M-K mutation test of net carbon emissions in Hubei Province during 2000—2010(A)和2011—2020(B)

U_F 和 U_B 统计量曲线在2011—2012年有交点,且交点位于95%置信区间内,说明2011年湖北省的

净碳排放量发生了突变。2011年之前湖北省净碳排放量呈现增加趋势,2011年之后湖北省净碳排放量

呈现减少趋势。2011—2020年, U_F 统计量小于0, 表明该时期湖北省净碳排放量略有减少, 尤其是2015—2018年, U_F 统计量大于其置信区间, 说明其降低有统计学意义。而2018年之后, 湖北省净碳排放量降低的趋势略有减小。

3 讨论

3.1 湖北省实现碳中和的优势与挑战

综合本研究与湖北省实际情况进行分析表明, 湖北省天然碳汇资源较好, 在抵消碳排放方面起到重要作用, 且在2000—2020年, 湖北省先后提出“退耕还林”等保护天然碳汇的举措和政策引导, 湖北省各类型碳汇在此期间都呈现增加趋势, 在多年的发展过程中也在不断优化调整发展方式。2009年11月10日湖北省颁布《湖北省人民政府关于发展低碳经济的若干意见》, 明确指出要大力发展低碳相关产业, 推动低碳技术及产品的推广应用, 建立低碳技术支撑体系等措施, 这些措施间接导致了2011年之后湖北省的净碳排放量相比之前开始呈现出下降的趋势, 在一定程度上说明湖北省当前的碳排放或许已经达到碳达峰的状态。

2000—2020年, 湖北省生态系统碳汇抵消了约30%的碳排放量, 可见天然碳汇在抵消碳排放的过程中起到了一定的作用, 但由于自然资源的限制^[21], 天然碳汇的总量与碳排放量的差距较大, 未抵消的碳排放量仍有很多, 目前仍需通过研发陆地碳汇提升的技术体系, 解析实现陆地生态系统增汇的技术途径^[3]以及加大碳捕获、低碳产业的投资力度。湖北省的碳排放量在第二阶段虽然有下降的趋势, 但是社会经济的不断发展不可避免会导致对能源等各行业的需求增加, 碳排放总量仍居高位, 2020年湖北省的碳排放量约为2000年碳排放量的2.6倍, 碳排放的脱钩压力也随之增大。未来仍要大力发展低碳相关产业, 推动低碳技术及产品的推广应用。且2018年之后净碳排放量下降的趋势并不确定, 未来碳中和能力的变化趋势仍需进一步探讨。

3.2 湖北省实现碳中和的碳减排应对策略

本研究结果显示, 湖北省的碳排放量中能源活动所产生的碳排放占很大比重, 占比约为71.31%, 未来可通过提高能源利用效率以及利用碳交易和碳税激励碳减排^[22]。且在能源活动产生的碳排放中煤炭、焦炭、原油、煤油、柴油等的碳排放量占比最大, 而天然气这类清洁能源的占比较小, 说明湖北省当

前的能源消费结构仍然以煤炭为主, 清洁能源的开发利用程度还不够。因此, 未来湖北省应当首先大力开发非化石能源来填补能源需求增长的空缺, 加快非化石能源替代化石能源进程, 改变由化石能源为主导的能源结构。发展非化石能源来替代煤电等化石能源是未来湖北省深度脱碳的根本途径, 也是各部门深度减碳的重要依托。

除了源头控制, 末端治理也是碳减排很重要的一部分^[23]。碳捕集技术是二氧化碳末端治理技术之一, 是实现二氧化碳封存以及后续综合利用的基础和前提, 膜分离技术和吸附分离技术是目前发展比较成熟的碳捕集分离技术。

实现碳减排目标不能仅仅“就碳论碳”, 要同时进行广泛而深刻的经济社会系统性变革, 这就需要政府、市场、企业共同发挥作用, 积极营造有利于绿色低碳发展的政策环境^[24], 让政府和企业都能够最大力度发挥作用, 引导各类资源要素向绿色低碳发展集聚, 支持企业朝着绿色转型的目标实现更大的发展^[25]。

3.3 湖北省实现碳中和的碳增汇应对策略

本研究结果显示, 生态系统碳汇能力仍有一定的增长空间, 能够为碳中和提供良好的生态基础。森林生态系统对湖北省碳汇的提升具有举足轻重的作用。提升森林碳汇一方面要持续生态保护重大工程的实施, 从而保证森林面积和蓄积量的不断提升; 另一方面要巩固住前期退耕还林还草的成果, 采取先进且多样化的森林管理和经营模式比如森林间伐、人工林天然化等来提升森林碳汇^[26]。

农田土壤具有极大的固碳减排潜力和减排成本优势, 是应对气候变化、实现碳中和的重要途径^[27]。高强度的农业生产活动会使土壤呼吸强度增大, 并且较高的土壤呼吸会加快土壤有机质的分解, 释放所固定的碳, 提升农田碳汇要优化传统耕作方式, 多采用少耕、免耕措施, 合理安排种植时间及强度, 强化农田土壤保护。通过退耕还林、还草和其他修复措施对耕作土壤进行修复也可以增强农田碳汇效应。且不同种类的农作物碳吸收能力不同, 因此, 在保证社会需求的前提下, 增加碳吸收强度较高的农作物的播种面积, 在一定程度上可提高农作物碳吸收总量, 从而达到农田生态系统增汇的目的。

目前湖北省草地资源底数不清, 草地数据的统计还较为粗放, 虽然湖北省在2019年已经开启了全省草原资源基础数据清查以加强草地监管, 但各地

工作进度不一,目前尚未形成完整的草地数据体系。未来应当建立起完善的草地资源科学评价体系,加大草地资源科学研究、生态环境监测及生物多样性保护。

湖北省湖泊湿地数量繁多,现有湿地面积为145.02 hm²,占湖北省国土面积的7.8%。位居中部地区第一位,这表明湖北省湿地具有一定碳中和的碳汇潜力。但由于受到经济社会的急速发展和人类活动的干扰,湖北省湿地面积减少,且污染情况有所加剧,许多湖泊湿地出现了富营养化的问题,面积减少和污染增加均会严重影响湿地碳汇功能的发挥。未来湖北省应当着力修复湿地生态系统,避免氮磷污染物直接排入,采取干预措施来改善湖泊水域的富营养化,从而提升湖泊的湿地碳汇功能。

但生态碳汇因为天然资源的限制,无法抵消大量的碳吸收,所以碳捕捉(carbon capture, utilization and storage, CCUS)是未来碳吸收工作的主力军。CCUS技术分为CO₂捕集和储存与CO₂利用2个部分。截至2020年,全球CO₂捕获能力已经达到4 000万t,CCUS技术已经成为最有效减少大气中CO₂的方法之一,然而当前CCUS技术非常昂贵,无法大量投入使用,必须降低其建设和运行成本^[28],开发出更为经济的CCUS技术将是未来重要的研究方向^[29]。

3.4 结果不确定性分析

在区域碳汇核算方面,近年来众多学者对不同区域不同生态系统固碳增汇功能开展一系列研究,为解析陆地生态系统碳汇能力和潜力奠定了坚实基础。本研究在选取参数时充分参考相关文献,在可靠的参数范围内结合湖北省的区域特征确定参数。森林碳汇核算时林木生物量转换系数、林木生物量干质量系数、林木固碳系数、林下植物碳汇转换系数、林地碳汇转换系数的取值及农田生态系统碳吸收核算时所用到的作物碳吸收系数均为相关研究通用的参数值。而对于研究基础较薄弱的草地碳汇和湿地碳汇方面所采用的碳密度参考了全球和国内草地碳密度的研究结果并结合湖北省的区域特点而确定。但不同研究者对陆地碳汇定义的差异、模型过程和参数的差异等导致目前对于陆地碳汇大小的认识仍存在一定的不确定性,未来需要加大生态系统的调查与监测力度,提高陆地碳汇的评估精度。

在区域碳排放核算方面,所采用的参数均来自《IPCC温室气体排放清单》《省级温室气体编制指南》以及湖北省统计年鉴。虽然IPCC给出了详细的

区域碳排放核算方法,但在实际应用中,大尺度区域内的基础数据有所缺乏也会导致一定的误差。但对于宏观的研究,误差在可接受范围内。

全球气候治理进入到了碳中和时代,越来越多的国家将碳中和作为21世纪中后期长期减排的目标。2020年中国承诺了实现碳中和的目标,这迫切要求建立一个系统、完整的碳中和能力评价体系,本研究从比较生态系统碳汇和碳排放差异的角度对湖北省区域碳中和能力进行了评价。本研究结果表明,湖北省天然碳汇资源较好,2000—2020年湖北省区域碳汇总量为238 441.33万t,各类型碳汇在这期间均呈现增加趋势,在抵消碳排放方面起到重要作用。同期湖北省碳排放总量为878 996万t,净碳排放总量为640 554万t,两者的变化趋势保持一致,其变化趋势可分为2个阶段,第一阶段(2000—2010年)呈上升趋势,经过不断优化调整发展方式后,第二阶段(2011—2020年)呈下降趋势,但这种趋势并不具有统计学意义,其变化仍存在较高的不确定性;湖北省净碳排放量及其碳中和能力的后续变化需要进一步深入探讨。由于自然资源的限制,天然碳汇不能完全抵消碳排放量,未来仍要加快攻克CCUS的技术难关。因此,当前湖北省距离碳中和目标的实现仍有较大难度,未来仍需从能源路径、技术路径、社会路径和政策经济路径4个方面统筹兼顾,合力实现碳中和目标。

参考文献 References

- [1] 方精云. 碳中和的生态学透视[J]. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1173-1176. FANG J Y. Ecological perspectives of carbon neutrality [J]. Chinese journal of plant ecology, 2021, 45(11): 1173-1176 (in Chinese with English abstract).
- [2] TESKE S, PREGGER T, SIMON S, et al. It is still possible to achieve the Paris climate agreement: regional, sectoral, and land-use pathways[J/OL]. Energies, 2021, 14(8): 2103[2023-05-09]. <https://doi.org/10.3390/en14082103>.
- [3] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学, 2022, 52(4): 534-574. YANG Y H, SHI Y, SUN W J, et al. Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality [J]. Scientia sinica (vitae), 2022, 52(4): 534-574 (in Chinese with English abstract).
- [4] PACALA S W, HURTT G C, BAKER D, et al. Consistent land- and atmosphere-based U.S. carbon sink estimates[J]. Science, 2001, 292(5525): 2316-2320.
- [5] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423-434. YU G R,

- HAO T X, ZHU J X. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 423-434 (in Chinese with English abstract).
- [6] SHI T M, WANG D, TANG Y, et al. Research progress on calculation method and impact factors of carbon sequestration capacity in urban ecosystems [J]. The journal of applied ecology, 2023, 34(2): 555-565.
- [7] 崔世华. 湖北省土地利用碳排放时空演变及土地利用优化研究 [D]. 武汉: 湖北大学, 2022. CUI S H. Temporal and spatial evolution of land use carbon emissions and land use optimization in Hubei Province [D]. Wuhan: Hubei University (in Chinese with English abstract).
- [8] 邹小伟. “双碳”战略目标背景下科技支撑湖北产业转型升级路径研究 [J]. 科技创业月刊, 2023, 36(10): 11-16. ZOU X W. Research on the path of Hubei's industrial transformation and upgrading supported by science and technology under the background of the strategic goal of “Dual carbon” [J]. Journal of entrepreneurship in science & technology, 2023, 36(10): 11-16 (in Chinese with English abstract).
- [9] 张颖, 吴丽莉, 苏帆, 等. 我国森林碳汇核算的计量模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 194-200. ZHANG Y, WU L L, SU F, et al. An accounting model for forest carbon sinks in China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(2): 194-200 (in Chinese with English abstract).
- [10] 范振林, 谭荣. 统筹自然资源管理 助力碳中和 [N]. 中国自然资源报, 2021-12-03(003). FAN Z L, TAN R. Integrate natural resource management to help carbon neutrality [N]. China Natural Resources Daily, 2021-12-03(003) (in Chinese).
- [11] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展 [J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9405-9416. ZHAO M Y, LIU Y X, ZHANG X Y. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems [J]. Acta ecologica sinica, 2022, 42(23): 9405-9416 (in Chinese with English abstract).
- [12] JANSSENS I A, FREIBAUER A, CIAIS P, et al. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7% to 12% of European anthropogenic CO₂ emissions [J]. Science, 2003, 300(5625): 1538-1542.
- [13] 赵荣钦. 农田生态系统碳源/汇的时空差异及增汇技术研究: 以中国沿海地区为例 [D]. 开封: 河南大学, 2004. ZHAO R Q. Research on the temporal-spatial differences of carbon sources and sinks of farmland ecosystems and the techniques to sequester carbon [D]. Kaifeng: Henan University, 2004 (in Chinese with English abstract).
- [14] 林秀群, 葛颖. 中国西南地区农田生态系统碳源/汇时空差异研究 [J]. 江苏农业学报, 2016, 32(5): 1088-1093. LIN X Q, GE Y. Temporal-spatial variation of carbon source-sink of farmland ecosystem in the Southwestern China [J]. Jiangsu journal of agricultural sciences, 2016, 32(5): 1088-1093 (in Chinese with English abstract).
- [15] 赵荣钦, 秦明周. 中国沿海地区农田生态系统部分碳源/汇时空差异 [J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(2): 1-6. ZHAO R Q, QIN M Z. Temporal-spatial variation of partial carbon source/sink of farmland ecosystem in coastal China [J]. Journal of ecology and rural environment, 2007, 23(2): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [16] 刘德荣, 吴澜, 刘兰, 等. 湖北省湿地植物多样性调查与生态修复策略研究 [J]. 林业调查规划, 2022, 47(6): 76-81. LIU D R, WU L, LIU L, et al. Wetland plant diversity and ecological restoration strategy in Hubei Province [J]. Forest inventory and planning, 2022, 47(6): 76-81 (in Chinese with English abstract).
- [17] 沈丽莉, 胡静. 浅谈湖北省湿地植物群落特征 [J]. 湖北林业科技, 2016, 45(6): 58-60. SHEN L L, HU J. On the characteristics of wetland plant community in Hubei Province [J]. Hubei forestry science and technology, 2016, 45(6): 58-60 (in Chinese).
- [18] 张秀梅, 李升峰, 黄贤金, 等. 江苏省1996年至2007年碳排放效应及时空格局分析 [J]. 资源科学, 2010, 32(4): 768-775. ZHANG X M, LI S F, HUANG X J, et al. Effects of carbon emissions and their spatio-temporal patterns in Jiangsu Province from 1996 to 2007 [J]. Resources science, 2010, 32(4): 768-775 (in Chinese with English abstract).
- [19] 蔡博峰. 城市温室气体清单研究 [J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(1): 23-28. CAI B F. A study on city greenhouse gas emissions inventory [J]. Advances in climate change research, 2011, 7(1): 23-28 (in Chinese with English abstract).
- [20] ZAREI A R. Rainfall variability and trends in arid and semi arid Iran, using Mann-Kendall test [J]. International journal of hydrology science and technology, 2016, 6(3): 285-299.
- [21] WANG N, ZHAO Y X, TAO S, et al. Accounting for China's net carbon emissions and research on the realization path of carbon neutralization based on ecosystem carbon sinks [J/OL]. Sustainability, 2022, 14(22): 14750 [2023-05-09]. <https://doi.org/10.3390/su142214750>.
- [22] 王雅楠, 左艺辉, 陈伟, 等. 环境规制对碳排放的门槛效应及其区域差异 [J]. 环境科学研究, 2018, 31(4): 601-608. WANG Y N, ZUO Y H, CHEN W, et al. Threshold effect and regional differences of environmental regulation on carbon emission [J]. Research of environmental sciences, 2018, 31(4): 601-608 (in Chinese with English abstract).
- [23] 陈通平, 李建军, 刘琪琪, 等. 二氧化碳减排综述 [J]. 四川化工, 2015, 18(5): 52-54. CHEN T P, LI J J, LIU Q Q, et al. Study of the reduction of carbon dioxide [J]. Sichuan chemical industry, 2015, 18(5): 52-54 (in Chinese with English abstract).
- [24] PENG Y, QI H Y. Analysis of China's carbon peak and carbon neutral policy agenda from the perspective of the multiple-streams approach [J]. Journal of humanities and social sciences studies, 2023, 5(1): 35-41.
- [25] 马玲. 寻找碳减排路径上的“最优解” [N]. Financial Times, 2023-03-30(2). MA L. Search for the “optimal solution” on the path of carbon reductio [N]. 2023-03-30(2) (in Chinese).

- [26] 于贵瑞,朱剑兴,徐丽,等.中国生态系统碳汇功能提升的技术途径:基于自然解决方案[J].中国科学院院刊,2022,37(4):490-501. YU G R, ZHU J X, XU L, et al. Technological approaches to enhance ecosystem carbon sink in China: nature-based solutions[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4):490-501 (in Chinese with English abstract).
- [27] 乐小芳,陈佳淳,苗璐.农业土壤碳汇研究综述[J].农业与技术,2020,40(22):8-10. YUE X F, CHEN J C, MIAO L. Review on carbon sequestration in agricultural soil[J]. Agriculture and technology, 2020, 40(22):8-10 (in Chinese).
- [28] 郑海富,夏勋荣,顾佳雨,等.“碳达峰”“碳中和”目标下的社会面发展现状、变革及对策[J].工业计量,2023,33(2):55-60. ZHENG H F, XIA X R, GU J Y, et al. Social Development Status, Reform and Countermeasures under the goal of “peak carbon dioxide emissions” and “Carbon Neutralization” [J]. Industrial metrology, 2023, 33(2):55-60 (in Chinese).
- [29] 吴振涛,庞小兵,韩张亮,等.二氧化碳捕集、利用与储存技术进展及趋势[J].三峡生态环境监测,2022,7(4):12-22. WU Z T, PANG X B, HAN Z L, et al. Progress and trends of carbon capture utilization and storage technology[J]. Ecology and environmental monitoring of three gorges, 2022, 7(4):12-22 (in Chinese with English abstract).

Evaluating the capacity of regional carbon neutrality in Hubei Province

MU Xiaoya, XU Tianle, GE Xiaodong, HUANG Jiajia, RONG Weikang, CAO Congge, ZENG Yanyu
College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract It is of great theoretical significance to study the changing characteristics of net carbon emissions and the capacity of regional carbon neutrality for accelerating the transformation of social and economic development and realizing the goal of carbon neutrality. In this article, the carbon emissions, carbon sinks and net carbon emissions in Hubei Province were evaluated with the methods given in *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* and *Guidelines for the Preparation of Provincial Greenhouse Gas Inventories*, carbon density method and other methods. The changing trend of net carbon emissions was studied to evaluate the capacity of regional carbon neutrality in Hubei Province. The results showed that the total amount of regional carbon sinks in Hubei Province from 2000 to 2020 was 264.178 million tons, showing a significant upward trend over the years, with an increase rate of about 135.21% and an average annual increase rate of about 6.76%. The total carbon emissions in Hubei Province from 2000 to 2020 was 910.331 million tons. The changing trend of total carbon emissions over the years was divided into two stages including the total carbon emissions in Hubei Province from 2000 to 2010 and from 2011 to 2020 showing a trend of significant increase and a trend of fluctuating downward, respectively. The net carbon emissions in Hubei Province from 2000 to 2010 had an upward trend, and the Z_{M-K} statistic passed the significance test with statistical significance. The net carbon emissions in Hubei Province from 2011 to 2020 had a downward trend, but the Z_{M-K} statistic failed the significance test, indicating that the net carbon emissions in Hubei Province had a downward trend in the second stage, but this trend was not statistically significant. It is indicated that there is still a huge gap between the carbon sink and carbon emissions of the ecosystem in Hubei Province, and there is still some uncertainty in the changes of net carbon emissions. Carbon reduction should be continued. The carbon sink function of the ecosystem should be optimized, and carbon capture technology and related industries vigorously developed.

Keywords carbon neutrality; carbon sink of the ecosystem; carbon emissions; optimizing the management; Hubei Province

(责任编辑:张志钰)